



**Marco António de
Matos Alves**

**Avaliação da resistência ao corte e fratura em
modo II de ligações coladas**



**Marco António de
Matos Alves**

**Avaliação da resistência ao corte e fratura em
modo II de ligações coladas**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de Alfredo Balacó Moraes, Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e de António Manuel de Bastos Pereira, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri / The jury

Presidente / President

Prof. Doutor Rui António da Silva Moreira

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Prof. Doutor Alfredo Balacó Morais

Professor Associado da Universidade de Aveiro (orientador)

Prof. Doutor Lucas Filipe Martins da Silva

Professor Associado com Agregação da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Agradecimentos / Acknowledgements

Agradeço em primeiro lugar ao orientador e co-orientador, Professores Alfredo Balacó de Moraes e António de Bastos Pereira, pela cooperação, ensinamentos, paciência e que muito ajudaram nesta dissertação e que contribuíram para o meu enriquecimento como Engenheiro.

Agradeço do fundo do coração às duas pessoas que permitiram que pudesse realizar este sonho, Pai e Mãe, obrigado por tornarem isto possível!

Um obrigado especial à minha Irmã por sempre me apoiar mesmo quando não era possível.

Um agradecimento a todos os meus amigos, com foco especial no Óscar e no Francisco por terem sido os melhores companheiros de casa, e à Tânia que nunca me deixou nestes anos todos.

Por fim, à Mariana, dedico esta vitória também a ti, por me ajudares a ser um homem melhor!

Palavras-chave

Adesivo; Fratura; Modo II; Ensaio de flexão; ENF; ARAMIS; Deformações; Aço; Ligações coladas.

Resumo

As ligações coladas são cada vez mais utilizadas na indústria devido às suas vantagens sobre os métodos de ligação tradicionais, como a soldadura, ligações aparafusadas e rebitadas. Apesar dessas vantagens, subsistem questões acerca do comportamento das ligações coladas, que continuam por isso a ser objeto de muita investigação.

Nesta dissertação foi feito um estudo sobre o comportamento ao corte e à fratura em modo II de um adesivo acrílico de utilização muito comum. Para isso foram realizados dois tipos de testes em juntas com aderentes de aço: o ensaio de flexão em três pontos e o ensaio *End-Notched Flexure* (ENF). O ensaio de flexão teve por objetivo principal a obtenção de uma aproximação elasto-perfeitamente plástica à curva de tensão-deformação ao corte do adesivo. Neste ensaio foi usada a técnica de correlação digital de imagem (CDI) para medir as deformações de corte no adesivo. Todavia, dificuldades na medição das deformações a níveis de carga relativamente baixos não permitiram obter valores rigorosos do módulo de corte. Por outro lado, as tensões de rotura medidas foram muito satisfatórias.

Nos ensaios ENF aplicou-se uma nova forma do método da fenda efetiva, tendo-se atingido o desejado patamar na taxa crítica de libertação de energia. Porém, as partes iniciais das curvas taxa crítica de libertação de energia versus comprimento de fenda efetivo tiveram formas algo fora do comum.

Keywords

Adhesive; Fracture; Mode II; Flexion test; ENF; ARAMIS; Deformations; Steel; Bonded joints.

Abstract

Adhesive joints are increasingly applied in industry because of their advantages over traditional joining methods such as welding, bolted and riveted joints. Despite those advantages, questions remain about the mechanical behaviour of adhesive joints, which therefore continue to be the subject of extensive research.

This work reports a study of the shear stress-strain behaviour and mode II fracture of a widely used acrylic adhesive. For that purpose, two types of tests were carried out on joints with steel adherents: the three-point bending test and the End-Notched Flexure (ENF) test.

The main objective of the three-point bending test was to obtain an elastic-perfectly plastic approximation to the adhesive shear stress-strain curve. The Digital Image Correlation (DIC) technique was used in the test to measure adhesive shear strains. However, accurate shear moduli could not be obtained because of difficulties in strain measurements at relatively low loads. In turn, measured strengths were very satisfactory.

In ENF tests a new form of the effective crack method was applied, and the critical strain-energy release rate reached the desired plateaux. However, the initial parts of the critical strain-energy release rate versus effective crack length curves had somewhat unusual shapes.

Conteúdo

1	Enquadramento e Estado da Arte	1
1.1	Definições gerais sobre juntas coladas	1
1.2	Tipos de juntas e solicitações	3
1.3	Tipos e seleção de adesivos	6
1.4	Execução das juntas	8
1.5	Ensaio de ligações coladas	9
1.6	Correlação Digital de Imagem - ARAMIS	11
1.7	Objetivos	12
2	Procedimentos Experimentais	13
2.1	Materiais	13
2.2	Preparação dos provetes e ensaios	14
3	Tratamento dos resultados experimentais	21
3.1	Ensaio de flexão	21
3.2	Ensaio ENF	23
4	Resultados e Discussão	25
4.1	Ensaio de Flexão	25
4.2	Ensaio ENF	32
5	Conclusões	37
	Referências	41
	Anexo A	45

Lista de Tabelas

1.1	Quadro resumo dos vários adesivos estruturais. [5]	8
2.1	Características gerais do Aço 2738 SUPER	13
2.2	Características gerais da Super Cola 3 - Loctite	14
4.1	Deslocamentos e cargas máximas nos ensaios de flexão.	27

Lista de Figuras

1.1	Resumo das várias etapas ao estudo das ligações coladas [4]	2
1.2	Tipos de esforços em juntas adesivas	3
1.3	Tipos principais de juntas coladas [8]	4
1.4	Comparação entre boas e más soluções de ligações coladas	5
1.5	Modos de rotura em juntas adesivas	5
1.6	Modos de solicitação de fendas - modo I, modo II e modo III, respetivamente [12]	6
1.7	Esquema de ensaio de flexão em 3 pontos	9
1.8	Representação dos vários testes de fratura de modo II	10
1.9	Esquema de montagem para medição experimental através de CDI [19]	11
1.10	Exemplo de câmara utilizada pelo sistema Aramis [20]	12
2.1	Super Cola 3 da Loctite	14
2.2	Processo de colagem	16
2.3	Pintura de acordo com o padrão do Aramis	16
2.4	Shimadzu AG-X Plus - 100 kN	17
2.5	Fotografia de ensaio de flexão realizado. O perímetro vermelho define a zona de medição da CDI.	17
2.6	Sensor MV 90x72	18
2.7	Fotografia de zona de pré-fenda	19
2.8	Exemplificação do ensaio ENF realizado	19
2.9	Pormenor do sistema de pontos brancos para medir deslocamento no ensaio ENF.	20
3.1	Esquema mostrando os contributos das rotações de flexão e das extensões axiais para o deslocamento de corte da camada adesiva [19].	21
3.2	Esquema da zona de cálculo da tensão de corte média pela equação 10.8. Os pontos x_1 e x_2 estão assinalados por círculos vermelhos.	23
3.3	Aproximação elasto-perfeitamente plástica adotada para descrever o comportamento do adesivo [15]	23
4.1	Superfícies de fratura dos provetes ensaiados	25
4.2	Estágios inicial e final referentes ao ensaio do provete 1	26
4.3	Estágios inicial e final referentes ao ensaio do provete 2	26
4.4	Estágios inicial e final referentes ao ensaio do provete 3	26
4.5	Curvas carga-deslocamento obtidas nos ensaios de flexão.	27
4.6	Distribuições de γ_a ao longo de metade do provete 1, entre o suporte ($x = 0$) e o ponto de carregamento ($x = L$), a vários níveis de carga.	28

4.7	Distribuições de γ_a ao longo de metade do provete 2, entre o suporte ($x = 0$) e o ponto de carregamento ($x = L$), a vários níveis de carga.	28
4.8	Distribuições de γ_a ao longo de metade do provete 3, entre o suporte ($x = 0$) e o ponto de carregamento ($x = L$), a vários níveis de carga.	29
4.9	Curvas $\tau_a - \gamma_a$ obtidas no ensaios e representação da aproximação elasto-perfeitamente plástica (EPP) usada posteriormente.	30
4.10	Comparação esquemática da aproximação elasto-perfeitamente plástica com o comportamento real de um adesivo.	30
4.11	Curvas carga-deslocamento experimentais e previstas pelo modelo com $G_a = 260$ MPa, $\tau_{ua} = 24.5$ MPa e 21 MPa.	31
4.12	Curvas carga-deslocamento experimentais e previstas pelo modelo com $G_a = 430$ MPa, $\tau_{ua} = 24.5$ MPa e 21 MPa.	31
4.13	Deformações de corte máximas no adesivo experimentais e previstas pelo modelo com $G_a = 260$ MPa e 430 MPa.	32
4.14	Curvas $P - \delta$ medidas nos ensaios válidos.	33
4.15	Curvas $G_{II} - a_e$ obtidas para os 3 provetes com resultados válidos.	34
4.16	Estimativa de G_a calculado a partir da flexibilidade inicial. A linha vermelha representa o valor médio.	34
4.17	Curvas $G_{II} - a_e$ entre o ponto de carga máxima e o fim do patamar. As linhas “traço-ponto” correspondem aos valores médios.	35

Capítulo 1

Enquadramento e Estado da Arte

1.1 Definições gerais sobre juntas coladas

As ligações coladas têm vindo a ganhar um lugar de destaque entre os métodos de união devido às suas excelentes características mecânicas. Por exemplo, estão cada vez a ser mais utilizadas nas indústrias automóvel, aeronáutica, de construção, medicina dentária, embalagens, etc [1]. Uma das primeiras aplicações de sucesso das ligações coladas remonta aos anos 1950-60 em estruturas de pontes cobertas na Alemanha. Todavia, o conhecimento das juntas coladas evoluiu muito na aeronáutica, com o aumento gradual do número de componentes colados, incluindo reparações coladas feitas a estruturas metálicas danificadas.[2] De facto, o interesse nas ligações coladas de componentes na aviação surgiu logo no início da Primeira Guerra Mundial, como por exemplo, o *Fokker Dr.I* na Alemanha. Porém, os maiores desenvolvimentos deram-se com a colagem de componentes de madeira e de madeira-metal durante a Segunda Guerra Mundial nos aviões Mosquito da RAF e *De Havilland Comet* em Inglaterra. Desde então, as ligações coladas têm sido utilizadas em dezenas de aeronaves, tanto militares como comerciais [2]. Mais recentemente, têm-se revelado a solução ideal para ligar diferentes materiais como alumínio, aço, titânio e compósitos de matriz polimérica [3].

Numa ligação colada os elementos ligados entre si são designados por substratos ou aderentes [4]. O comportamento mecânico da ligação depende de diversos fatores, tais como as forças envolvidas, a cola, os substratos e o grau de adesão entre a cola e os substratos, que é fortemente condicionado pelos processos de preparação das superfícies. As etapas a cumprir no estudo e execução das ligações coladas estão esquematizadas na Figura 1.1.

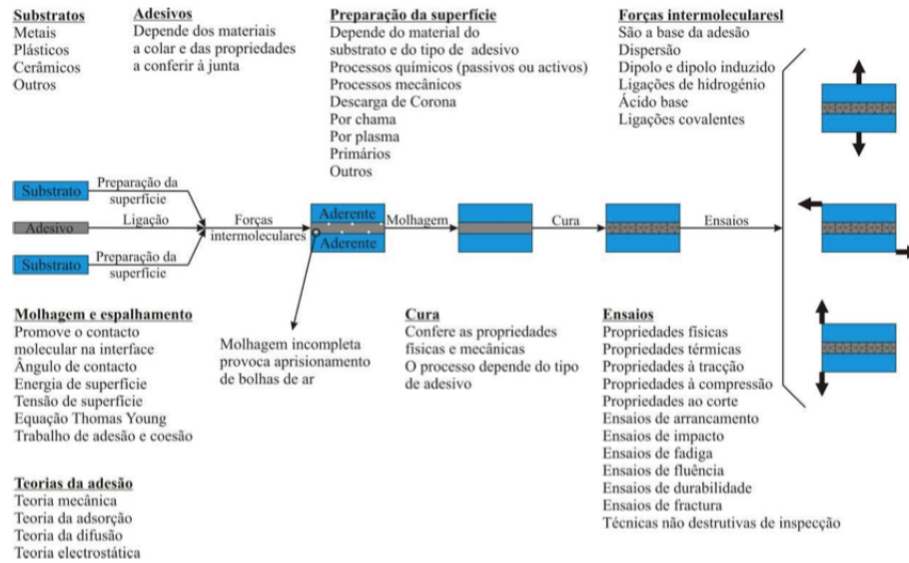


Figura 1.1: Resumo das várias etapas ao estudo das ligações coladas [4]

Um dos fenómenos mais importantes na resistência mecânica da ligação é a adesão, que resulta da afinidade da cola, ou adesivo, aos substratos. A adesão deve-se às forças de atração entre as moléculas do adesivo e dos átomos ou moléculas das superfícies a colar. O segundo fenómeno é a coesão, que decorre da resistência interna a esforços do adesivo [5].

As ligações coladas constituem uma alternativa às formas de ligação tradicionais, como as ligações aparafusadas, rebitadas e soldadas, pois apresentam várias características vantajosas [5][6][7][8]

- Resistência mecânica elevada, graças à eliminação dos furos geradores de concentração de tensões e à ausência de alterações metalúrgicas associadas a soldadura;
- Eliminação do peso adicional de parafusos e rebites;
- Redução de custos de manutenção, reduzindo a corrosão dos substratos;
- Capacidade de vedação, isolamento térmico e de amortecimento de vibrações;
- Boa aparência estética.

Todavia, é necessário ter em conta algumas limitações [6][9]

- Métodos de dimensionamento sem o rigor desejável;
- Resistência mecânica sob condições extremas de temperatura e humidade;
- Sensibilidade a cargas de clivagem;

- São necessárias ferramentas de fixação para manter as peças em posição aquando da colagem;
- Necessidade de procedimentos cuidados na preparação de superfícies;
- Impossibilidade de desmontagem sem destruição da junta.

1.2 Tipos de juntas e solicitações

A Figura 1.2 representa os principais tipos de esforços a que as juntas podem estar sujeitas.

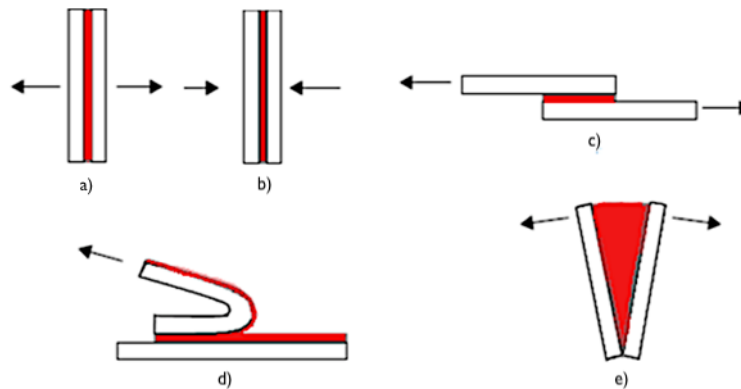


Figura 1.2: Tipos de esforços em juntas adesivas: a) Tração, b) Compressão, c) Corte, d) Arrancamento, e) Clivagem [4]

Os tipos principais de ligações coladas e a nomenclatura respetiva são resumidos na Figura 1.3 [6]. Estas ligações destinam-se sobretudo a transmitir forças de tração nos substratos.

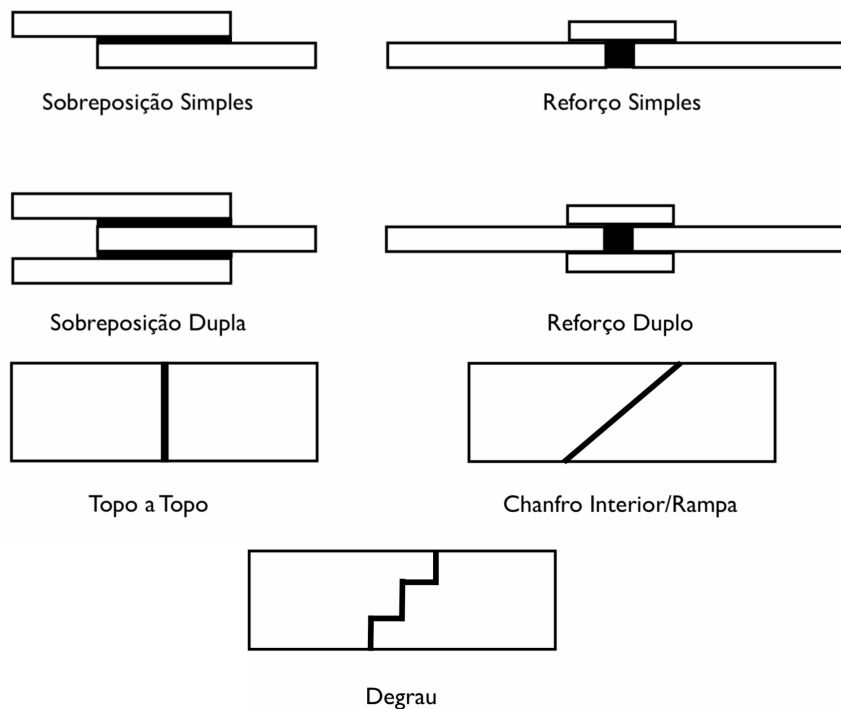


Figura 1.3: Tipos principais de juntas coladas [8]

As juntas mais utilizadas são as de sobreposição. As juntas de reforço simples e de reforço duplo têm um comportamento semelhante às juntas de sobreposição simples e dupla, respectivamente.

As juntas de sobreposição simples têm baixa eficiência estrutural, devido, sobretudo, ao efeito de flexão dos substratos que resulta da não-colinearidade das forças de tração a que estão normalmente sujeitas. Este efeito de flexão provoca a rotação da junta e gera tensões de tração localizadas junto aos bordos. Estas tensões são particularmente prejudiciais à resistência da ligação.

As juntas de sobreposição têm desempenho adequado apenas para aderentes finos, e a sua capacidade de carga não aumenta indefinidamente com o comprimento de sobreposição. Por seu turno, as juntas em escada e em rampa têm bastante melhor desempenho, mas os custos de execução são substancialmente mais elevados.

O projeto de ligações coladas deve ter em atenção a sua geometria, de forma a evitar tensões de tração, arrancamento e clivagem. A Figura 1.4 exemplifica boas e más soluções.

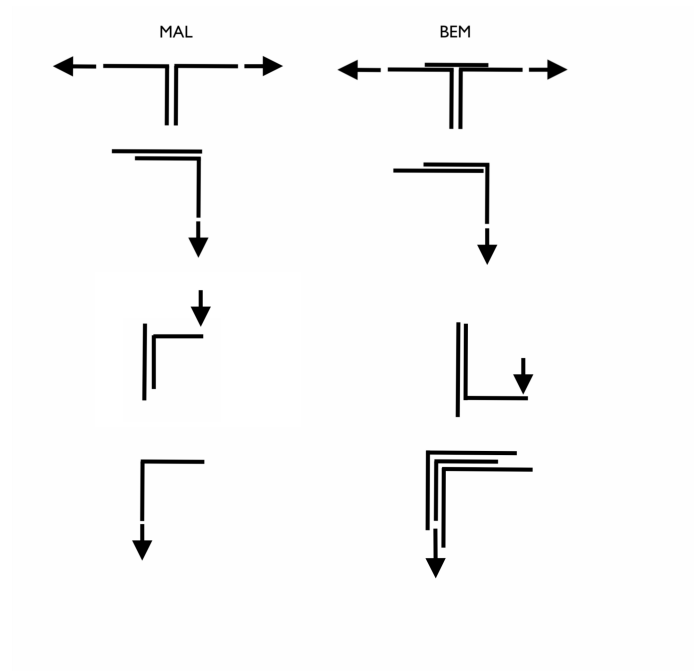


Figura 1.4: Comparação entre boas e más soluções de ligações coladas

Os principais modos de rotura das ligações coladas são os seguintes (Figura 1.5) [5][10][11]

- Rotura adesiva, que se dá na interface entre o adesivo e um dos aderentes; após a rotura é possível verificar que a superfície de um dos aderentes não apresenta vestígios de cola;
- Rotura dos aderentes, que são portanto menos resistentes do que a ligação;
- Rotura coesiva, que ocorre no adesivo, ficando ambas as superfícies do substrato cobertas com algum adesivo após a rotura;
- Rotura mista, habitualmente a combinação de roturas adesiva e coesiva.

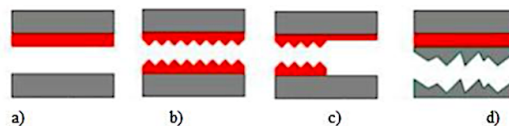


Figura 1.5: Modos de rotura em juntas adesivas: a) rotura adesiva, b) rotura coesiva, c) rotura mista e d) rotura do aderente [4]

Em princípio, é desejável que o modo de rotura seja coesivo. As principais causas das roturas adesivas são a contaminação e/ou preparação inadequada das superfícies

e a exposição prolongada a ambientes de temperatura e humidade relativamente elevadas.

É possível encontrar na literatura vários critérios de rotura que têm sido usados com mais ou menos sucesso na previsão da resistência de juntas coladas [10]. Estes critérios baseiam-se habitualmente em tensões ou deformações máximas.

A Mecânica da Fratura também tem sido aplicada à previsão da resistência de juntas coladas. Esta abordagem considera a existência de um defeito inicial, prevendo a sua propagação segundo um dos 3 modos básicos de solitação de fendas (Figura 2.5), ou em combinação deles. A propagação da fenda numa ligação colada é prevista quando a taxa de libertação de energia de deformação atinge um valor crítico.

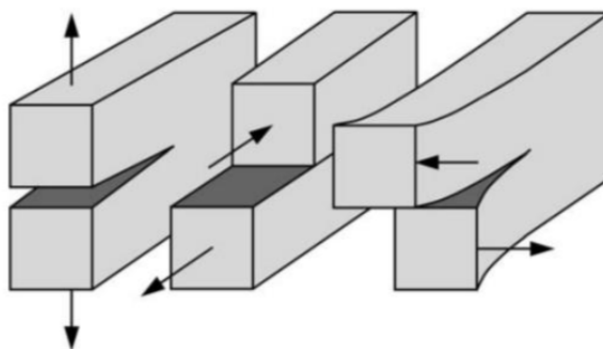


Figura 1.6: Modos de solitação de fendas - modo I, modo II e modo III, respetivamente [12]

1.3 Tipos e seleção de adesivos

Os adesivos podem ser classificados de acordo com a sua função, composição química, forma física, custo e aplicação. As classificações mais comuns distinguem adesivos:

- Sintéticos dos naturais;
- Termoplásticos dos termoendurecíveis, elastómeros ou híbridos.
- Estruturais dos não estruturais.

Consideram-se estruturais os adesivos que apresentam uma resistência ao corte superior a 5-10 MPa, além de terem capacidade para manter uma resistência considerável nos ambientes mais comuns. A principal função de um adesivo estrutural é manter ligados componentes sujeitos a cargas elevadas sem sofrerem grandes deformações [5]. Dentro dos adesivos estruturais há várias propriedades a ter em conta, tais como:

- Resistência ao corte;

- Temperatura máxima de funcionamento;
- Resistência à fluência;
- Resistência ao arrancamento;
- Resistência a choques;
- Resistência a solventes.

Atualmente, são cinco os principais tipos de adesivos estruturais: [10]

- Fenólicos;
- Acrílicos;
- Poliuretanos;
- Polímidas;
- Epóxidos.

Sendo que há várias formulações com diferentes características em cada tipo. A Tabela 1.1 resume algumas das propriedades principais, incluindo a forma como se apresentam: líquida ou pasta mono ou bi-componente, ou filme [5][6].

Outro fator importante na escolha de um adesivo é a forma como desenvolvem a rigidez e a resistência [5]. Isso pode implicar reação química de cura, como sucede com os adesivos termoendurecíveis, eliminação de água ou de outro solvente, ou simplesmente arrefecimento a partir do estado fundido.

Tabela 1.1: Quadro resumo dos vários adesivos estruturais. [5]

Tipo	Apresentação	Temperatura máxima de utilização em contínuo [°C]	Resistência		
			Corte [MPa]	Arrancamento	Fluência
Acrílicos	Anaeróbicos	Líquido	120 – 150	Boa	Média
	Cianoacrilatos	monocomponente	80	10 – 35 Mediocre	Má
Epóxidos	Epóxido-fenólicos	Líquido monocomponente Filme	200 – 250	20	Boa Mediocre
	Epóxido-nitrilo	Filme	100 – 120	10 – 46	Boa Média
	Epóxido-poliamida	Líquido bicomponente	80	15 – 25	Mediocre Boa
	Epóxido-polisulfitos	Líquido bicomponente	80	15 – 25	Mediocre Boa
Fenólicos	Fenólicos-nitrilo	Líquido monocomponente Filme	140 – 170	15 – 30	Média Boa
	Fenólicos-vinílicos	Líquido monocomponente Líquido + pó Filme	100 – 130	17 – 35	Média Boa
	Poliimida	Filme	250 – 300	10 – 15	Boa Má
	Poliuretano	Líquido bicomponente	90	8 – 15	Média Boa

1.4 Execução das juntas

A preparação das superfícies dos substratos é fundamental para evitar rutura adesiva, a qual impede que se tire pleno partido das propriedades do adesivo. Outros objetivos são [9]:

- Promover a ligação de aderentes particularmente difíceis de colar, como é o caso de certos tipos de polímeros;
- Melhorar a durabilidade da junta, principalmente em ambientes de temperatura e humidade elevada, ou com exposição a agentes químicos corrosivos.

O tipo de tratamento necessário depende dos substratos a ligar e do adesivo, mas envolve sempre uma fase de limpeza, com eliminação de contaminantes como óleos ou gorduras. Seguidamente, procede-se à modificação química da superfície e/ou à alteração da topografia da superfície, com a criação de uma superfície mais rugosa e capilar [5].

Os materiais metálicos têm na sua superfície impurezas e óxidos que prejudicam a molhagem adequada por parte do adesivo, devido à sua baixa energia superficial. Geralmente, é aconselhável substituir a camada de óxidos inicial por outra de características químicas e mecânicas bem controladas, e mais favoráveis à colagem. Por exemplo, nas porosidades dos aços podem entrar moléculas de água, o que conduz à formação de ferrugem. Os óxidos e hidróxidos formados neste processo prejudicam a adesão do substrato ao adesivo, e, portanto, devem ser eliminados por tratamento mecânico e/ou químico. Para o tratamento mecânico são utilizadas a lixagem ou granalhagem, seguidas de limpeza com agentes desengordurantes, tais como a acetona e o tricloroetano [5][12]. Nos tratamentos químicos usam-se normalmente ácidos clorídrico e sulfúrico. Nas ligas de Al, a anodização em ácido fosfórico cria uma superfície muito favorável à colagem.

Outro fator importante para garantir o sucesso da ligação é o controlo da espessura da camada adesiva. Para a maioria dos adesivos estruturais, o intervalo ótimo é habitualmente 0,1-0,5 mm [13].

1.5 Ensaios de ligações coladas

São vários os ensaios que se podem realizar para avaliar a resistência e integridade das juntas coladas. Dentro dos ensaios destrutivos, são de salientar os ensaios de corte por via de tração dos aderentes de juntas de sobreposição, arrancamento, torção, impacto, fadiga e fratura. Entre os ensaios não-destrutivos, cuja finalidade é avaliar a existência de formas de dano raramente visíveis a olho nu destacam-se a inspeção ultra-sónica por líquidos penetrantes e radiografia [14].

Este trabalho centrou-se na medição da resistência ao corte. Usou-se um ensaio de flexão em 3 pontos tal como proposto por Morais [15]. O provete é constituído por duas barras de substrato coladas por um adesivo com espessura controlada inferior a 0.7 mm (Figura 1.7)

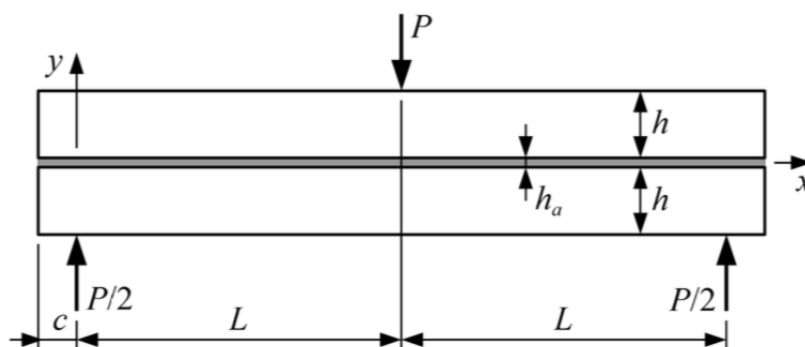


Figura 1.7: Esquema de ensaio de flexão em 3 pontos [15]

Este ensaio permite medir o comportamento tensão-extensão ao corte de adesivos

com as seguintes vantagens em relação a outros:

- Usa um dispositivo de ensaio simples;
- A resistência medida não é afetada por efeitos de fim-de-junta que se verificam nas juntas de sobreposição;
- Gera uma zona significativa com tensão de corte aproximadamente constante.

Para conseguir medições válidas é necessário escolher com cuidado a geometria e os materiais do provete, que deve ser relativamente longo para evitar efeitos de compressão do adesivo junto ao ponto de carregamento e nos suportes, assim como para obter a referida zona de tensão de corte quase constante. Por outro lado, um provete demasiado longo pode gerar tensões de flexão altas no substrato, que deve permanecer em regime elástico. Portanto, a espessura h das barras deve ser considerável e o material escolhido para substrato deve ter uma tensão de cedência elevada.

Outro aspeto do comportamento ao corte avaliado neste trabalho foi a fratura em modo II. Os provetes para esses ensaios são juntas coladas nas quais é criada uma fenda inicial inserindo uma película fina com características desmoldantes. Os ensaios mais comuns são o *End-notched Flexure* (ENF), *End-loaded Split* (ELS) e *Four-point End-notched Flexure* (4ENF) (Figura 1.8), cada um com as suas vantagens e desvantagens.

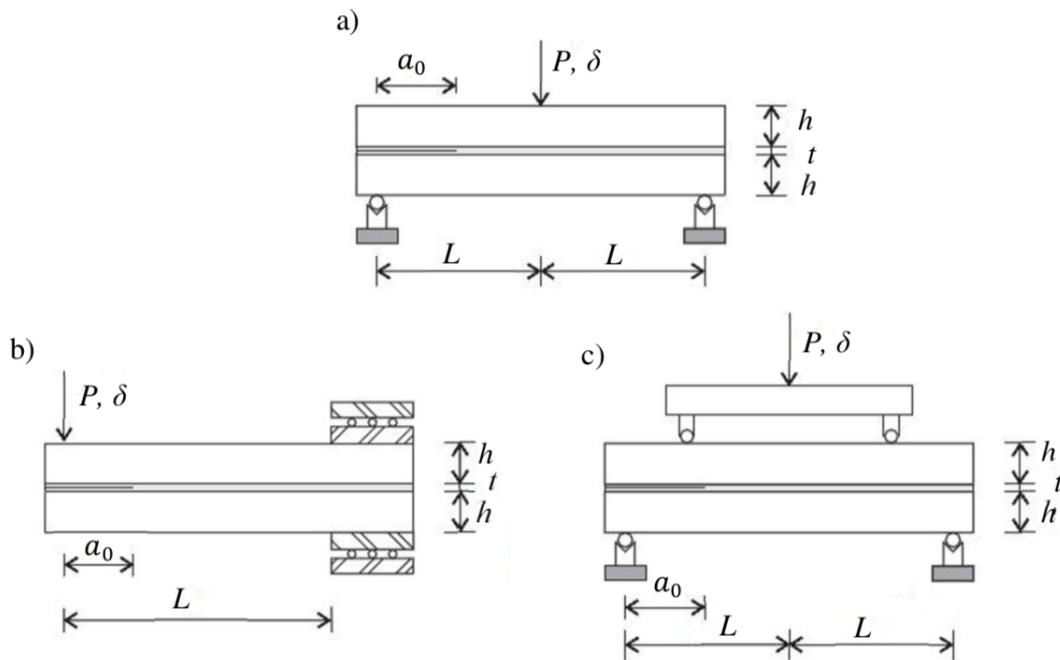


Figura 1.8: Representação dos vários testes de fratura de modo II: a) ENF b) ELS c) 4ENF [16]

Os provetes ELS promovem uma propagação estável da fenda, mas têm tendência para grandes deslocamentos e o encastramento de uma das extremidades constitui uma fonte de variabilidade de resultados. Os ensaios 4ENF apresentam alguns problemas de atrito na zona da pré-fenda, assim como dificuldades na calibração da flexibilidade. O ensaio mais comum e simples para caracterizar a fratura em modo II é o ENF [16][17], e foi usado neste trabalho.

A análise do ensaio ENF tendo em vista a obtenção de G_{IIc} baseia-se na teoria das vigas [17] e deve ter em consideração a longa zona de processo de fratura, na qual o adesivo sofre deformações plásticas e desenvolve micro-fendas. Isto faz com que o comprimento da fenda a (Figura 1.8) seja substituído por um comprimento de fenda efetivo a_e , calculado a partir da flexibilidade $C = \delta/P$ medida no ensaio. Este método designa-se por método da fenda efetiva, e tem as vantagens de ser mais rigoroso e de não necessitar da medição do comprimento da fenda durante o ensaio, tarefa que é particularmente difícil nos ensaios de modo II. Morais [18] realizou uma análise do ensaio ENF de juntas coladas que conduziu a expressões para a_e e G_{IIc} que foram usadas neste trabalho.

1.6 Correlação Digital de Imagem - ARAMIS

A evolução que se verificou na fotografia digital e na computação permite atualmente utilizar a tecnologia de processamento de imagem como método de medição de deformações bastante preciso. A Correlação Digital de Imagem (CDI) teve origem na década de 80 do século XX e tem ganho lugar de destaque no âmbito das técnicas óticas. A CDI assenta na comparação entre imagens digitais gravadas por uma ou duas câmaras digitais antes e durante a deformação do corpo (Figura 1.9).

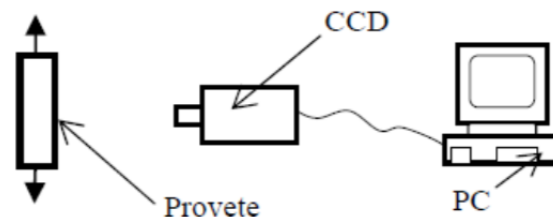


Figura 1.9: Esquema de montagem para medição experimental através de CDI [19]

A zona que vai ser lida por este sistema terá de ser preparada através da criação de um padrão de textura aleatória, que se baseia num conjunto de pontos pretos e brancos [19].

Na aplicação desta técnica devem ser utilizadas fontes de iluminação de cor branca, estáveis e controláveis, direcionadas para o objeto em estudo, de modo a garantir um bom contraste nas imagens e precisão na correspondência do padrão. Logo, a aplicação da CDI em meio exterior é mais complicada, visto ser quase impossível controlar as variações de iluminação, entre outros fatores. Recolhidas as imagens necessárias, faz-se a

seleção de um ponto na imagem digital não deformada e este método determina a nova posição desse mesmo ponto na configuração deformada [19].

A CDI tem vindo a ser utilizada em diversos ensaios de caracterização de materiais. Em particular, têm sido desenvolvidas diversas metodologias com base na CDI para estudar o comportamento à fratura de diversos materiais. Nesta dissertação o Software usado é o Aramis (Figura 1.10).



Figura 1.10: Exemplo de câmara utilizada pelo sistema Aramis [20]

Este sistema oferece uma solução estável para análise de campo completo e de pontos de objetos com dimensões que vão da ordem dos milímetros a metros. O sistema tem uma elevada precisão de medição, com resolução em imagens a três dimensões (3D) da ordem dos micrómetros, independentemente da geometria e temperatura do provete.

1.7 Objetivos

Este trabalho teve por objeto de estudo o comportamento mecânico ao corte de um adesivo estrutural acrílico. De facto, nas juntas bem concebidas, as tensões de corte devem ser dominantes.

Os objetivos específicos foram aplicar, pela primeira vez:

- O ensaio de flexão em 3 pontos, tal como proposto por Morais [15] para obter uma aproximação elasto-plástica à curva tensão-deformação ao corte do adesivo;
- A CDI ao estudo do campo de deformações no referido ensaio;
- Uma nova técnica de análise de resultados de ensaios de fratura em modo II ENF, desenvolvida recentemente por Morais [18].

Capítulo 2

Procedimentos Experimentais

2.1 Materiais

O material escolhido para os aderentes foi o Aço AISI P20, fornecido pela empresa Ramada Aços, com a designação Aço 2738 SUPER. Trata-se de um aço ligado para trabalho a frio ou quente, fornecido já com tratamento térmico. A Tabela 2.1 apresenta as suas propriedades principais.

Tabela 2.1: Características gerais do Aço 2738 SUPER

Densidade (g/cm^3)	7,85
Condutibilidade Térmica (W/mk)($20^\circ C$)	38
Módulo de Elasticidade (GPa)($20^\circ C$)	205
Dureza (HB)	290 - 330
Resistência à Tração (MPa)	993
Tensão de Cedência (MPa)	826
Alongamento (%)	17

Face aos estudos apresentados por Morais [18][21], concluiu-se que este aço tinha tensão de cedência suficientemente elevada para os ensaios de flexão em pontos e ENF.

Depois de extensa pesquisa e contactos com fornecedores, nos quais se constatarem restrições relativas a quantidades mínimas e prazos de entrega, optou-se pela utilização da Super Cola 3, adesivo acrílico da Loctite (Figura 2.1), que está disponível em vários estabelecimentos comerciais.



Figura 2.1: Super Cola 3 da Loctite

Na realidade, trata-se de um adesivo com resistência mecânica elevada, capaz de colar vários tipos de materiais, tais como plásticos, borrachas, metais, madeiras, cerâmicos, entre outros. Ademais, tem duas características que facilitam grandemente a sua utilização:

- Sendo um adesivo acrílico, é menos exigente na preparação das superfícies que outros adesivos estruturais como os epóxidos; o fornecedor recomenda apenas uma limpeza cuidada das superfícies a colar;
- É mono-componente e efetua colagens relativamente rápidas.

A Tabela 2.2 resume algumas das principais características.

Tabela 2.2: Características gerais da Super Cola 3 - Loctite

Composição	Etil-cianoacrilato
Aparência	Líquido transparente
Densidade (g/cm^3)(20°C)	1,08
Viscosidade ($mPa.s$)	50-120
Resistência ao corte (N/mm^2)	2 a 20, dependendo do substrato
Força de adesão - Aço (N/mm^2)	17-24
Tempo total de cura (h)	12 - 24

2.2 Preparação dos provetes e ensaios

Os provetes do ensaio de flexão reutilizaram barras já usadas em trabalhos anteriores. O primeiro passo foi, portanto, a remoção de restos da cola de todas as superfícies das barras de aço recorrendo a um X-ato e lixa de água de granulometria 300. Após esta primeira limpeza, procedeu-se à retificação de duas barras de modo a corrigir ligeiros

empenamentos detetados. No final, as barras ficaram com dimensões nominais 202 mm (comprimento) x 22 mm (largura) x 10.8 mm (espessura), exceto nas barras retificadas, que ficaram com 9.8 mm de espessura.

Seguidamente, a preparação das superfícies dos provetes consistiu em:

- Aplicar novamente lixa de forma a remover quaisquer outras impurezas que pudessem existir;
- Desengordurar com acetona;
- Passar papel aderente húmido para remover qualquer vestígio de acetona;
- Secar novamente com papel.

Após a secagem, procedeu-se logo à colagem para evitar que as superfícies ficassem novamente com resíduos. Na colagem foi usado um suporte para que os substratos ficassem alinhados tanto longitudinalmente como transversalmente. Foi colocado o primeiro substrato no suporte e aplicada a cola de modo a que a mesma ficasse uniforme na sua espessura em toda a superfície do provete (Figura 2.3). Como a cola usada é de fixação e endurecimento rápido, a segunda barra foi colocada rapidamente e de forma precisa em cima da outra, aplicando-se pressão logo de seguida para assim dar início à fixação. De referir a utilização de:

- Papel nas faces laterais das barras para que não ficassem coladas às paredes do suporte;
- Uma chave de fendas para que a barra inferior permanecesse completamente imóvel.

Foram coladas 10 barras, o que resultou em 5 provetes para ensaios. Após a colagem, os conjuntos de provetes foram deixados a curar à temperatura ambiente. Verificou-se que, com esta cola e com este método, não foi possível garantir um valor fixo de espessura da cola. A análise de resultados da CDI permitiu verificar que a espessura da cola variou em cada provete entre 0.25 e 0.36 mm. Para efeitos de análise e tratamento de dados considerou-se a espessura média $h_a = 0.3$ mm. Também se constatou que, apesar dos esforços em alinhar os dois substratos, alguns ficaram ligeiramente desalinhados, o que pode ter afetado os resultados, sobretudo de 2 provetes que tiveram cargas e deslocamentos de rutura inferiores aos restantes.

Decorridas 24 horas após a colagem, removeu-se o excesso de cola nos bordos com um X-ato e procedeu-se:

- À pintura de um dos bordos com tinta branca;
- À criação do padrão *Speckle* necessário para as medições com a CDI, através de um *spray* de tinta preta.

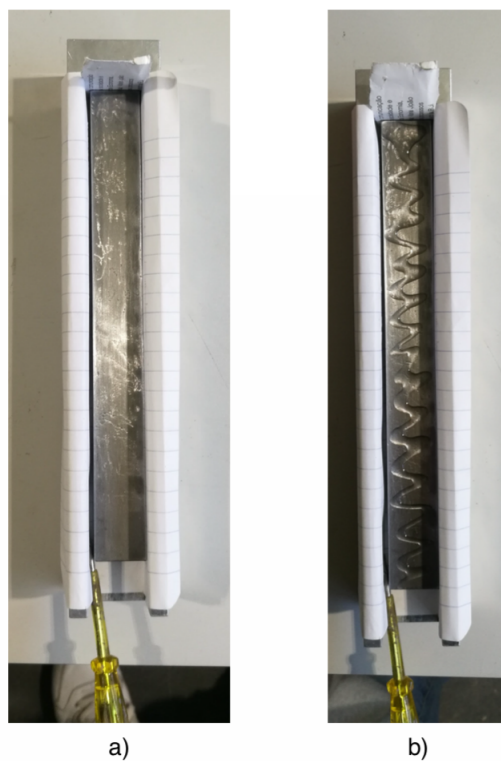


Figura 2.2: Processo de colagem: a) Fixação com chave de fendas b) Aplicação da cola

A Figura 2.3 mostra os provetes nestas fases de preparação.



a)



b)



c)

Figura 2.3: Pintura de acordo com o padrão do Aramis: a) Barras sem tinta b) Barras pintadas de branco c) Barras salpicadas com tinta preta

Os ensaios foram realizados na máquina Shimadzu AG-X Plus - 100 kN (Figura 2.4), presente no laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica.



Figura 2.4: Shimadzu AG-X Plus - 100 kN

Montou-se na máquina o suporte necessário para os ensaios, ficando a distância entre os apoios em $2L = 180 \text{ mm}$ (Figura 1.7). Posteriormente, colocou-se o provete no suporte (Figura 2.5), tendo o cuidado de o alinhar longitudinal e transversalmente, e calibrou-se o *software* da máquina para definir o zero da curva carga-descolamento.

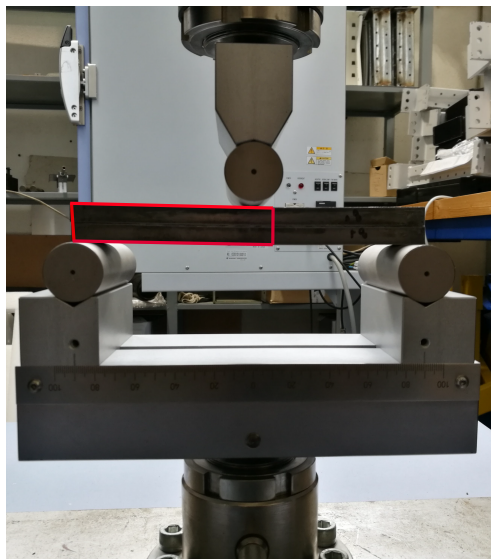


Figura 2.5: Fotografia de ensaio de flexão realizado. O perímetro vermelho define a zona de medição da CDI.

Preparou-se então o sistema Aramis, em que se definiu uma zona de medida apro-

ximadamente igual a metade do provete (Figura 2.5), dada a simetria do estado de deformação. Tendo em conta o sistema de câmaras disponível no Departamento de Engenharia Mecânica, a consulta do manual da GOM [20] permitiu:

- Efetuar a escolha correta do sensor de calibração, neste caso o MV 90x72 (Figura 2.6);
- Definir as distâncias corretas, tanto das câmaras ao objeto como entre elas, assim como o ângulo entre as câmaras.

No Anexo A apresenta-se a configuração adotada para a correta calibração do sistema.

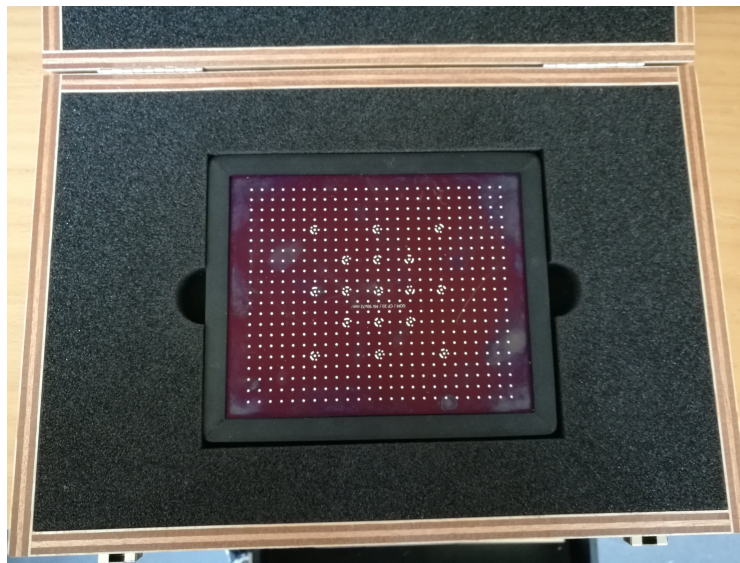


Figura 2.6: Sensor MV 90x72

O sistema Aramis foi configurado para aquisição de 10 imagens por segundo, com um máximo de 200 imagens por ensaio. Porém, antes iniciar o ensaio, captaram-se as imagens do provete essenciais para base de comparação com as imagens do provete deformado durante o ensaio. Os ensaios foram realizados com uma velocidade de deslocamento do rolo superior de 1,0 mm/min.

Efetuados os ensaios, combinaram-se com a devida sincronização os dados provenientes da máquina de ensaios e do Aramis.

A preparação dos provetes ENF foi muito semelhante à dos provetes dos ensaios de flexão. As barras foram fornecidas em bruto, tendo sido necessário proceder à sua retificação para que ficassem com as medidas pretendidas. Após retificação, as barras ficaram com dimensões nominais de 540 mm (comprimento) x 25 mm (largura) x 8 mm (espessura).

O processo de limpeza envolveu novamente lixagem com lixa de granulometria 300, desgorduramento com acetona, cujos restos foram posteriormente removidos com papel húmido, e secagem com papel. A colagem apenas diferiu do processo anterior no facto

de ter sido definida uma zona de pré-fenda, na qual foi inicialmente aplicada fita adesiva (Figura 2.7) e depois uma película de PTFE com espessura média de 0.4 mm . Esta película tinha 155 mm de comprimento, medido a partir de um dos topos, de modo a garantir um comprimento de fenda inicial $a_0 = 115\text{ mm}$ (Figura 1.8). A colagem tornou-se algo mais delicada, dada a necessidade de garantir o alinhamento e efetuar a colagem com rapidez suficiente.



Figura 2.7: Fotografia de zona de pré-fenda

Passadas 24 horas após a colagem, foram então feitos os ensaios, em que se adotou um comprimento entre apoios $2L = 460\text{ mm}$ (Figuras 1.8 e 2.8). Na Figura 2.8 pode ver-se na zona da fenda inicial a película branca de PTFE.

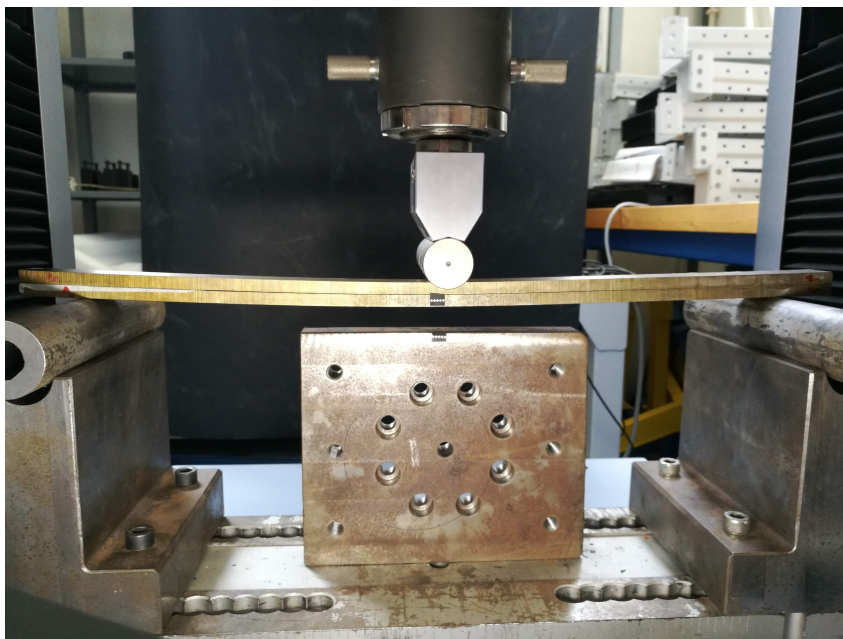


Figura 2.8: Exemplificação do ensaio ENF realizado

Notar que, em vez de padrões Speckle para a medição no Aramis, foram utilizados adesivos com pontos brancos num fundo preto (Figura 2.9), que são adequados para a medição dos descolamentos.

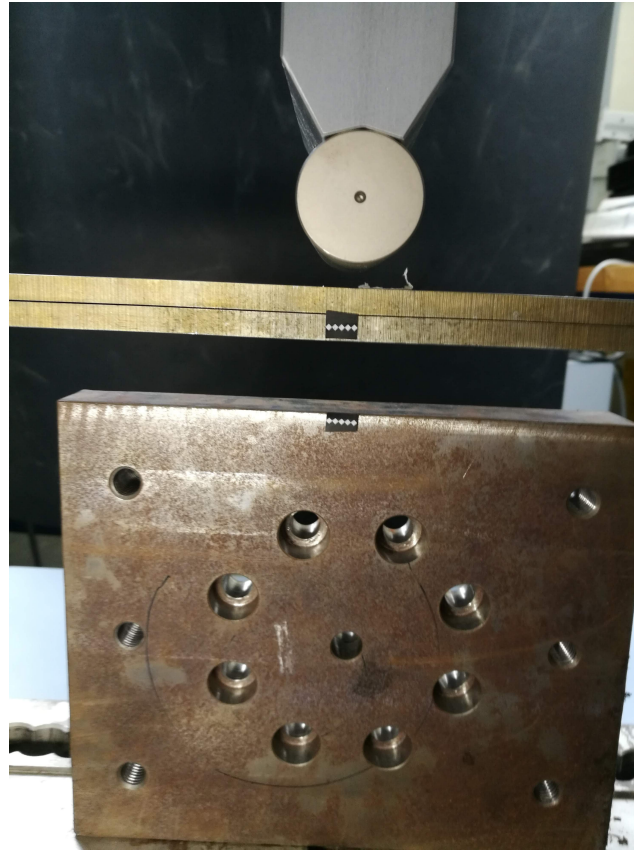


Figura 2.9: Pormenor do sistema de pontos brancos para medir deslocamento no ensaio ENF.

Capítulo 3

Tratamento dos resultados experimentais

3.1 Ensaio de flexão

Face à espessura da camada adesiva, os deslocamentos de corte foram muito pequenos, não tendo sido possível medi-los pela CDI. Por outro lado, recorrendo às extensões normais nos substratos segundo a direção do comprimento do provete (ε_x) conseguiu-se obter as extensões de corte na camada adesiva (γ_a). Para isso utilizou-se as equações base do modelo desenvolvido por Moraes. [15] De facto, segundo o referido modelo, o deslocamento u_a relativo das superfícies coladas do substrato resulta das rotações de flexão e das extensões normais nos substratos $\varepsilon_{x,a}$ (Figuras 1.7 e 3.1), o que permite escrever:

$$u_a = -h\theta + 2 \int_x^L \varepsilon_{x,a} dx \quad (3.1)$$

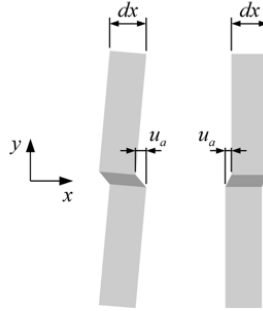


Figura 3.1: Esquema mostrando os contributos das rotações de flexão e das extensões axiais para o deslocamento de corte da camada adesiva [19].

Por outro lado, a Teoria das Vigas e a lei de *Hooke* estabelecem as relações:

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{M}{EI} \quad (3.2)$$

$$\sigma_{x,b} = \frac{Mh/2}{I} = E\varepsilon_{x,b} \quad (3.3)$$

Nestas equações M o momento fletor, E o módulo de Young do substrato, $I = bh^3/12$ o segundo momento de área, e $\sigma_{x,b}$ e $\varepsilon_{x,b}$ a tensão e a extensão de flexão à superfície, respetivamente. Como a camada adesiva é fina, pode-se admitir que:

$$\gamma_a \approx \frac{u_a}{h_a} \quad (3.4)$$

Deste conjunto de equações resulta:

$$\gamma_a = \frac{2}{h_a} \int_x^L [\varepsilon_{x,b} - \varepsilon_{x,a}] dx \quad (3.5)$$

Devido à simetria no plano $x = L$ (Figura 1.7), $\gamma_a(L) = 0$.

Na prática, a CDI dá as extensões totais ε_x , que podem ser decompostas nas componentes de flexão e de força axial, sabendo que, em cada secção do substrato, as primeiras variam linearmente na direção y da espessura (Figura 1.7) e as segundas são constantes nessa direção. Partindo desta base teórica, fez-se um tratamento dos resultados da CDI relativos aos campos de ε_x no substrato inferior para vários níveis de carga.

Relativamente às tensões de corte no adesivo (τ_a), o modelo desenvolvido por Moraes [15] prevê que:

$$\tau_a = \frac{2}{b(h + h_a)} \left(\frac{P}{4} - \frac{dM}{dx} \right) \quad (3.6)$$

Usando a equação 10.3 obtemos:

$$\tau_a = \frac{2}{h + h_a} \left(\frac{P}{4b} - \frac{Hh^2}{6} \frac{d\varepsilon_{x,b}}{dx} \right) \quad (3.7)$$

Esta relação que permitiria determinar as distribuições de τ_a com base nos valores de extensões medidas pela CDI. Porém, é sabido que as operações matemáticas de derivação magnificam o ruído dos sinais medidos e, portanto, como seria de esperar, não foi possível obter distribuições de τ_a com suficiente rigor. Ainda assim, e de forma a ter alguma base de comparação com os resultados do modelo de Moraes [15], calculou-se uma tensão de corte média ao longo de uma distância ($x_2 - x_1$)

$$\bar{\tau}_a = \frac{2}{h + h_a} \left(\frac{P}{4b} - \frac{Eh^2}{6} \frac{\varepsilon_{x,b}(x_2) - \varepsilon_{x,b}(x_1)}{x_2 - x_1} \right) \quad (3.8)$$

Nesta distância γ_a tinha um valor não inferior a 90% do máximo, conforme o esquema da Figura 3.2. Com base neste método foram traçadas curvas $\tau_a - \gamma_a$, sendo esta última a deformação de corte média na zona definida na Figura 3.2.

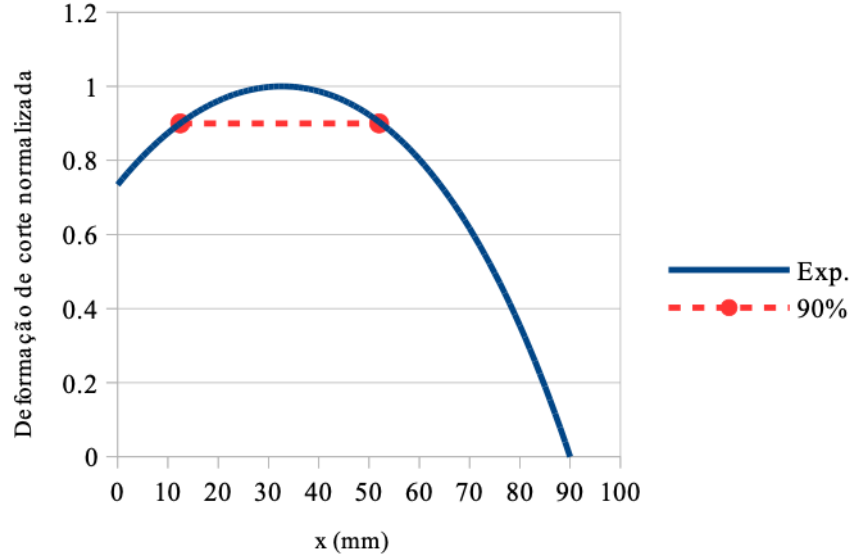


Figura 3.2: Esquema da zona de cálculo da tensão de corte média pela equação 10.8. Os pontos x_1 e x_2 estão assinalados por círculos vermelhos.

Finalmente, com o objetivo principal de determinar a tensão de rutura ao corte do adesivo τ_{ua} , aplicou-se o modelo desenvolvido por Morais [15]. Este modelo assenta numa aproximação elasto-perfeitamente plástica (Figura 3.3).

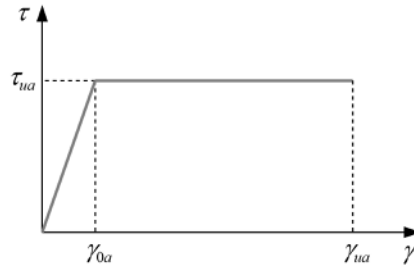


Figura 3.3: Aproximação elasto-perfeitamente plástica adotada para descrever o comportamento do adesivo [15]

De facto, os resultados obtidos por Morais [15] mostraram que a curva carga-deslocamento era bastante sensível a τ_{ua} . Para aplicar o modelo, recorreu-se a uma folha de cálculo com o modelo implementado. Compararam-se as previsões do modelo para as curvas carga-deslocamento e para as deformações de corte máximas no adesivo com os valores experimentais.

3.2 Ensaio ENF

Neste ensaio o tratamento de dados baseou-se no Método da Fenda Efetiva (MFE) na forma desenvolvida por Morais [18]. A partir da curva (P) carga - deslocamento (δ)

calculou-se a flexibilidade $C = \delta/P$ e, posteriormente o comprimento de fenda equivalente (a_e)

$$a_e = \sqrt[3]{\frac{Ebh^3(8h + 6h_a)C - 2\xi hL^3}{3(h + h_a)}} \quad (3.9)$$

Onde intervém o

$$\xi = 1 + \frac{9(h + h_a)(-1)}{h(\lambda L)^3} \quad (3.10)$$

Que, por sua vez, é função de

$$\lambda = \frac{1}{h} \sqrt{\frac{G_a(8h + 6h_a)}{Eh_a}} \quad (3.11)$$

Ambos parâmetros relacionados com a distribuição de tensões de corte no adesivo. Este último pode ser determinado a partir do valor da flexibilidade inicial da curva, porque nessa fase $a_e = a + 1/\lambda$.

Finalmente, calculou-se a taxa de libertação de energia de deformação

$$G_{II} = \frac{9(h + h_a)P^2 a_e^2}{2Eb^2h^3(8h + 6h_a)} \quad (3.12)$$

E as curvas $G_{II} - a_e$.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

4.1 Ensaios de Flexão

A Figura 4.1 mostra as superfícies de fratura pós-ensaio, expostas depois das barras terem sido completamente separadas com auxílio de x-ato. Pode-se ver que os provetes nº 1 e nº 3 tiveram rutura plenamente coesiva, enquanto que no provete nº 2 houve falhas localizadas na colagem junto a bordos, o que fez com que a tinta usada na CDI penetrasse nessas falhas.

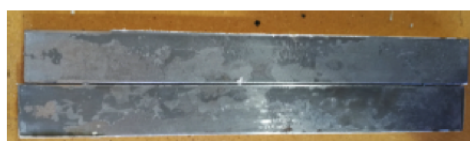
As Figuras 4.2 a 4.4 mostram fotografias obtidas pela CDI em 8 estágios dos ensaios de 3 provetes. Não se vislumbra qualquer dano até à rutura, que, quando ocorre, fica claramente visível o estalar da tinta usada para as medições da CDI. No caso do provete 2, porém, a CDI não captou o instante da rotura.



Provete nº 1



Provete nº 2



Provete nº 3

Figura 4.1: Superfícies de fratura dos provetes ensaiados

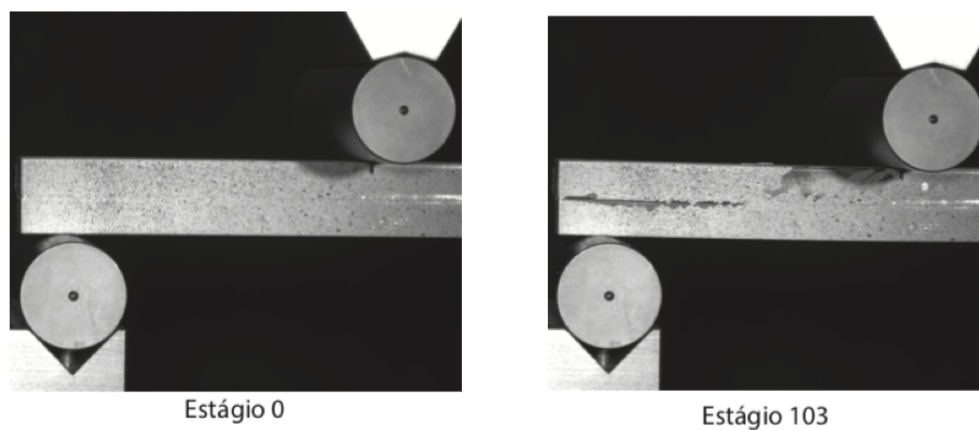


Figura 4.2: Estágios inicial e final referentes ao ensaio do provete 1

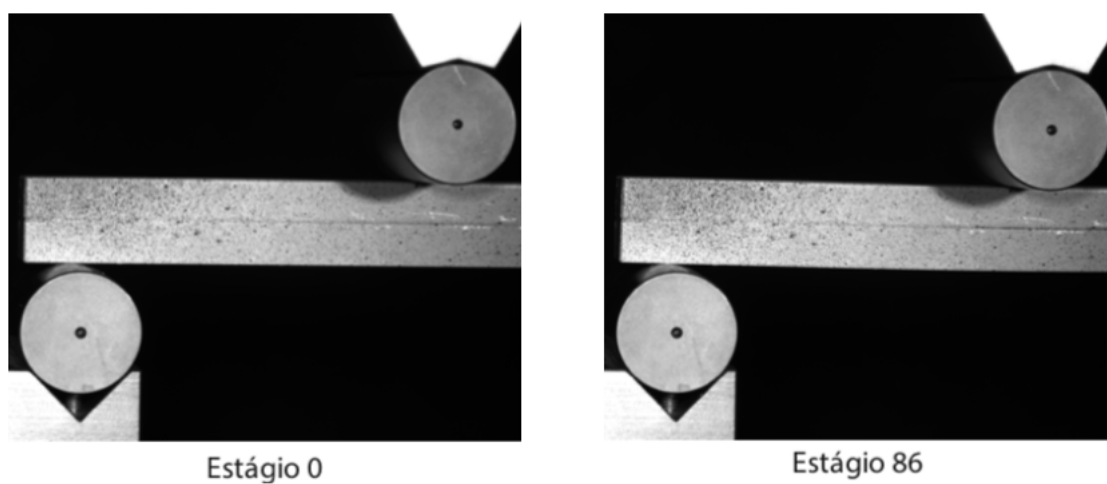


Figura 4.3: Estágios inicial e final referentes ao ensaio do provete 2

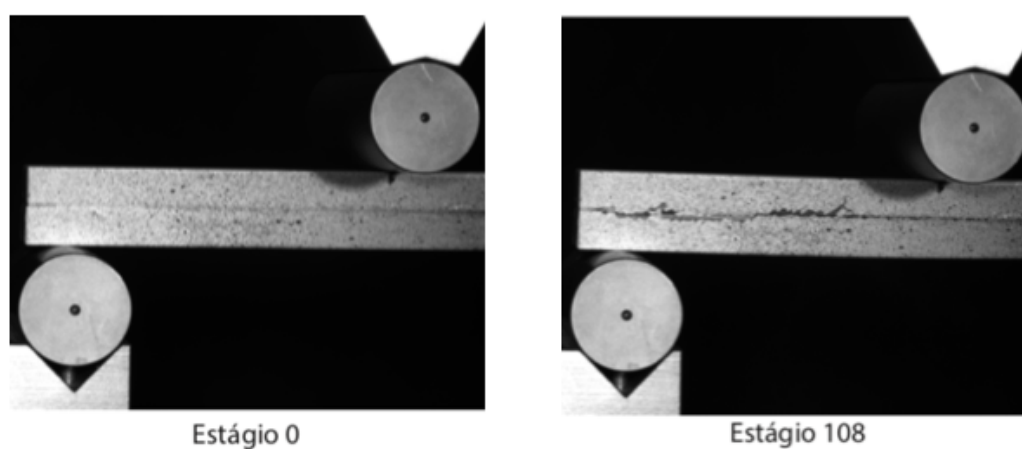


Figura 4.4: Estágios inicial e final referentes ao ensaio do provete 3

A Figura 4.5 apresenta as curvas carga-deslocamento dos 3 provetes. As formas das curvas são muito semelhantes às previstas por Morais [15]. De notar que os provetes 1 e 3 têm um comportamento quase igual, enquanto que o provete 2 ficou um pouco aquém em termos do nível de carga final. Isso deveu-se certamente aos defeitos de colagem nos bordos acima referidos. Todavia, a carga de rotura foi menos de 10% inferior à dos outros provetes (Tabela 12.1).

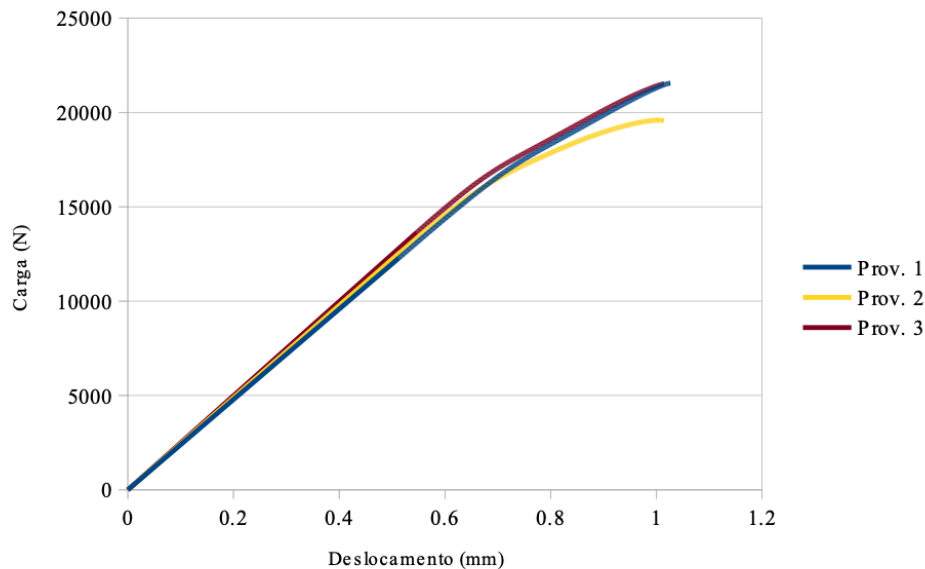


Figura 4.5: Curvas carga-deslocamento obtidas nos ensaios de flexão.

Tabela 4.1: Deslocamentos e cargas máximas nos ensaios de flexão.

Proвете	δ_{max} (mm)	Pmax (kN)
1	1.03	21.55
2	1.01	19.59
3	1.01	21.52
Média	1.02	20.89
Desv. Pad (%)	1.01	5.37

Nas Figuras 4.6 a 4.8 são apresentadas as distribuições da deformação de corte no adesivo γ_a em que é possível fazer algumas observações:

- A cargas mais baixas, as distribuições de γ_a , não foram realistas devido ao ruído nas medições da CDI e ao facto das extensões normais nos aderentes serem muito pequenas;
- Por seu turno, a cargas mais elevadas (acima de 12.5 kN), as referidas distribuições são claramente realistas, tendo valor máximo em zona intermédia, conforme previsto por Morais [15];

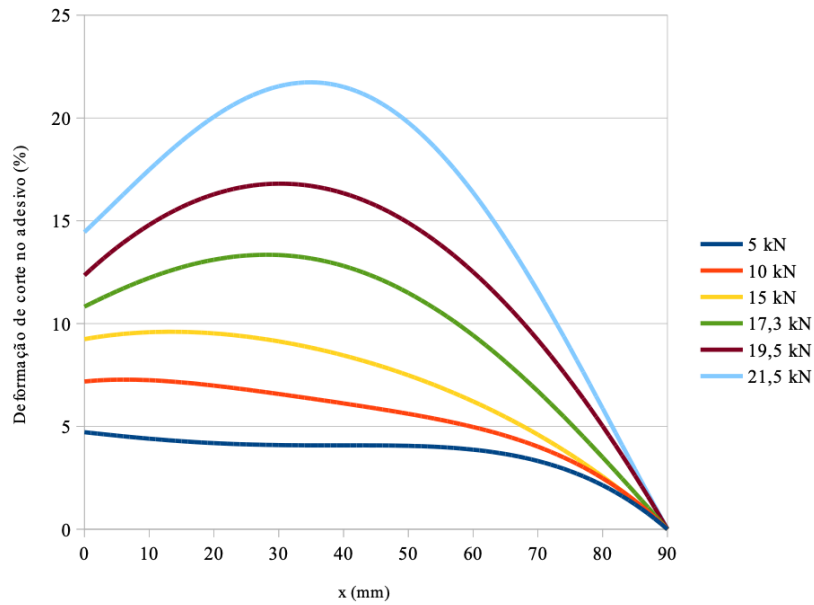


Figura 4.6: Distribuições de γ_a ao longo de metade do provete 1, entre o suporte ($x = 0$) e o ponto de carregamento ($x = L$), a vários níveis de carga.

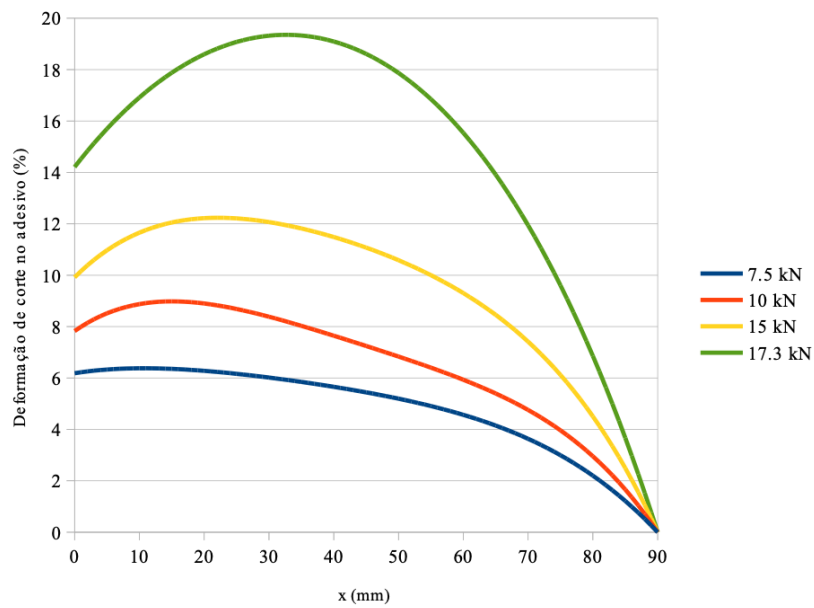


Figura 4.7: Distribuições de γ_a ao longo de metade do provete 2, entre o suporte ($x = 0$) e o ponto de carregamento ($x = L$), a vários níveis de carga.

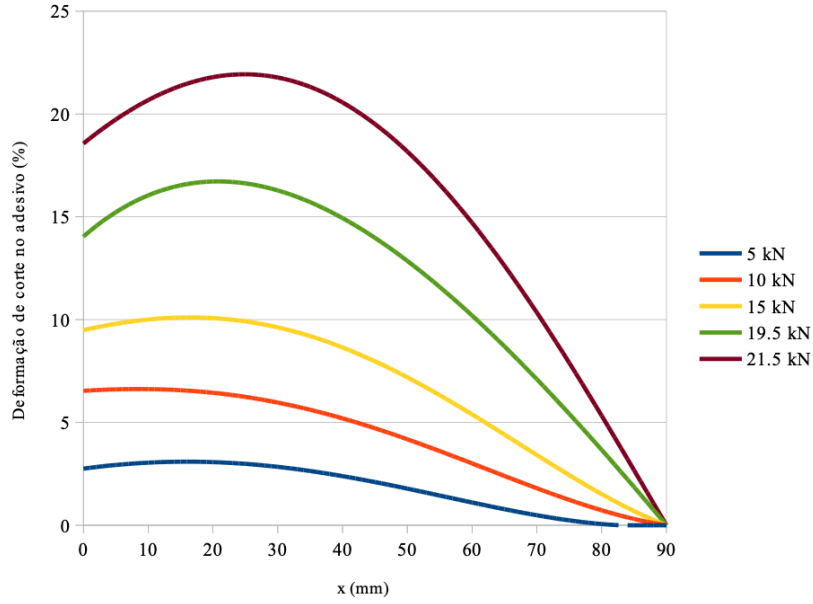


Figura 4.8: Distribuições de γ_a ao longo de metade do provete 3, entre o suporte ($x = 0$) e o ponto de carregamento ($x = L$), a vários níveis de carga.

A Figura 4.9 apresenta as curvas $\tau_a - \gamma_a$, que, apesar das irregularidades esperadas nos valores de τ_a , são bastante realistas:

- Face aos dados do fabricante, que aponta para uma resistência ao corte de 15 a 25 MPa;
- Na medida em que indicam a existência de um patamar, o que está de acordo com a maior parte dos estudos experimentais acerca da resistência ao corte de adesivos dúcteis.

Na aplicação do modelo de Morais[15] os principais parâmetros para tentar ajustar as curvas experimentais foram a tensão de rutura ao corte τ_{ua} e o módulo de corte médio G_a até à referida tensão. Notar que G_a deve ser algo inferior ao módulo de corte do adesivo G_a , medido na zona linear inicial bastante limitada da curva $\tau_a - \gamma_a$, conforme a representação esquemática da Figura 4.10.

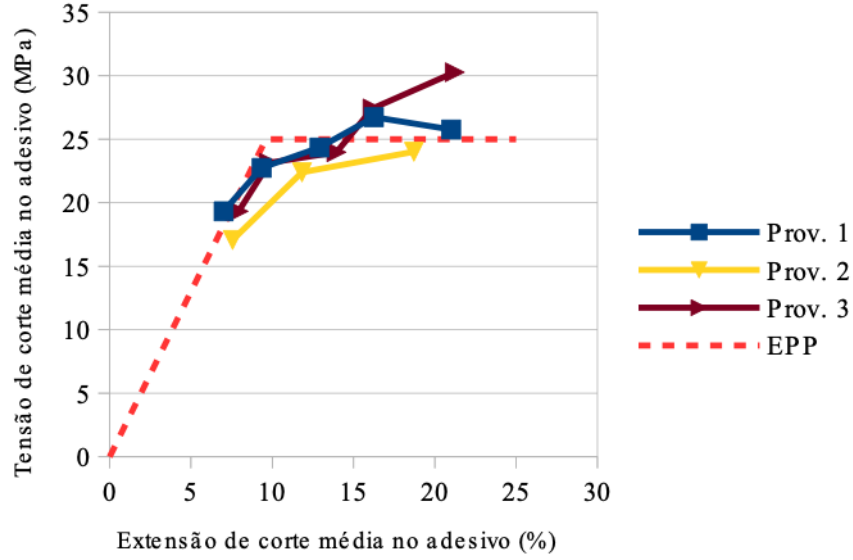


Figura 4.9: Curvas $\tau_a - \gamma_a$ obtidas no ensaios e representação da aproximação elasto-perfeitamente plástica (EPP) usada posteriormente.

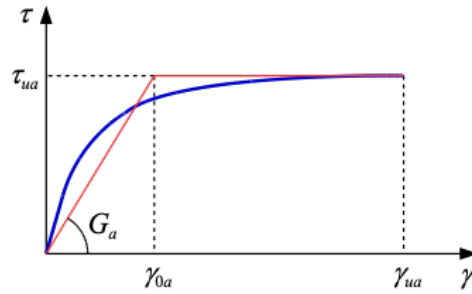


Figura 4.10: Comparação esquemática da aproximação elasto-perfeitamente plástica com o comportamento real de um adesivo.

Usando $G_a = 260 \text{ MPa}$ conseguiu-se ajustar bem as partes finais das curvas carga-deslocamento dos provetes 1 e 3 com valores de $\tau_{ua} = 24.5 \text{ MPa}$ (Figura 4.11). Já para o provete 2, atingiu-se esse ajuste para $\tau_{ua} = 21 \text{ MPa}$. Por outro lado, a rigidez inicial e as cargas na zona intermédia das curvas são subestimadas, muito provavelmente devido à aproximação elasto-perfeitamente plástica subestimar tensão de corte (Figura 4.10).

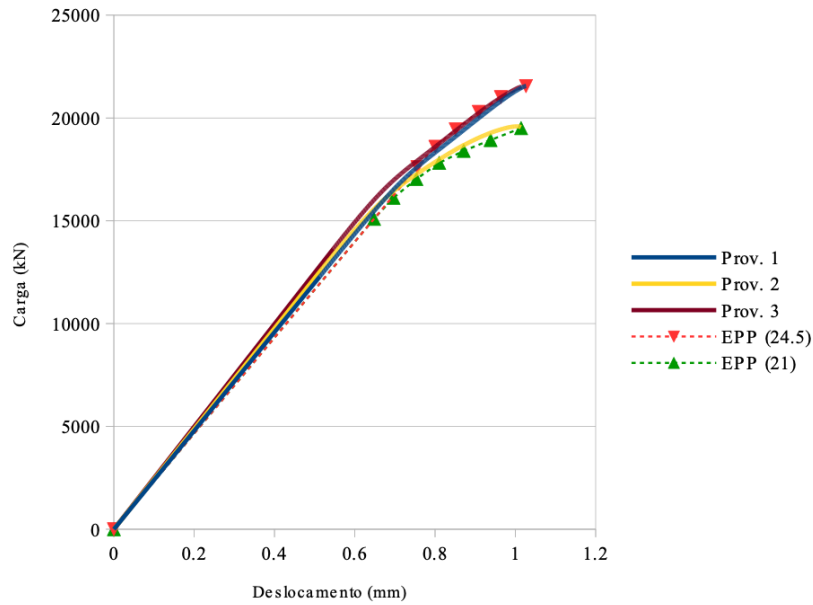


Figura 4.11: Curvas carga-deslocamento experimentais e previstas pelo modelo com $G_a = 260$ MPa, $\tau_{ua} = 24.5$ MPa e 21 MPa.

Com $G_a = 430$ MPa consegue-se um melhor ajuste da flexibilidade inicial, mas, antes da carga máxima, a carga prevista para os provetes 1 e 3 é algo sobrestimada (Figura 4.12).

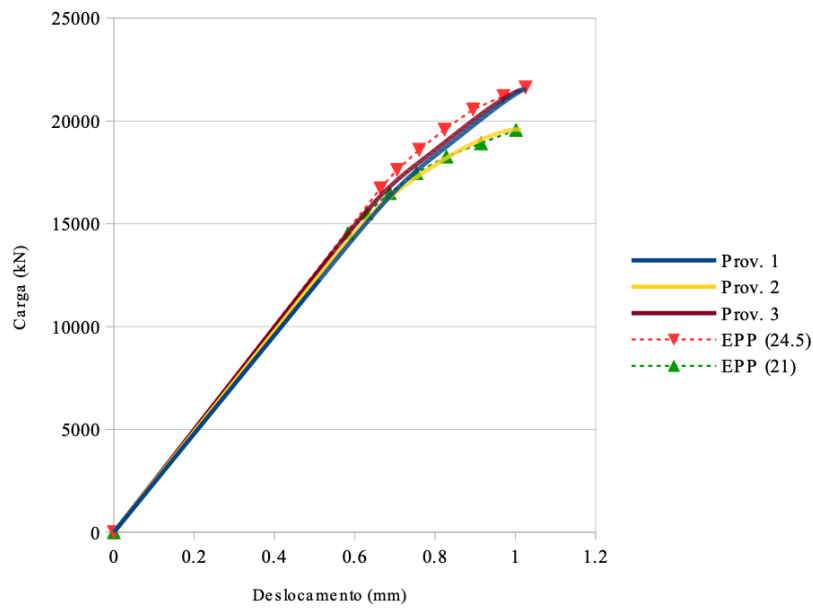


Figura 4.12: Curvas carga-deslocamento experimentais e previstas pelo modelo com $G_a = 430$ MPa, $\tau_{ua} = 24.5$ MPa e 21 MPa.

Todavia, a comparação dos valores experimentais das extensões máximas (Figura 4.13) com as previsões dos modelos é mais favorável a $G_a = 260$ MPa. Em qualquer caso, o modelo subestima as deformações experimentais, o que se explica pela aproximação elasto-perfeitamente plástica adotada e por outras aproximações implícitas no modelo de Moraes [15]. De qualquer forma, a tensão de rotura ao corte τ_{ua} estimada pelo modelo não é afetada por esta incerteza no valor de G_a . De facto, as curvas previstas pelo modelo tornam-se cada vez mais próximas à medida que se chega ao ponto de rotura.

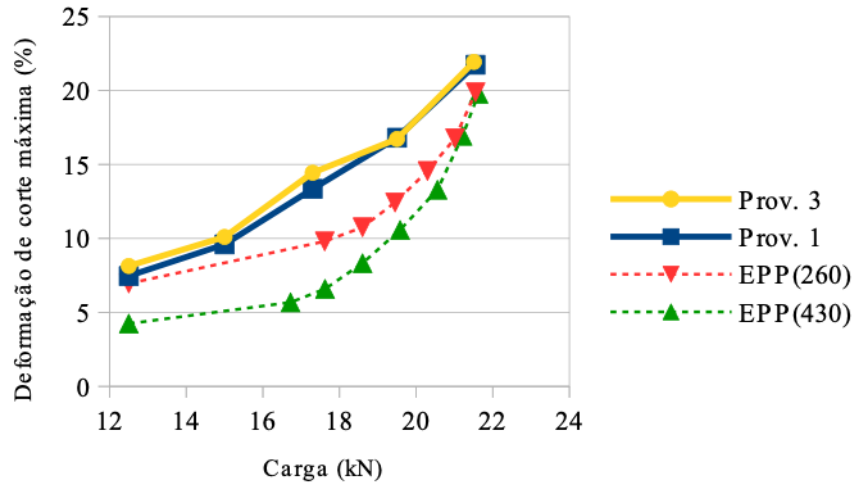


Figura 4.13: Deformações de corte máximas no adesivo experimentais e previstas pelo modelo com $G_a = 260$ MPa e 430 MPa.

Finalmente, é de referir que os valores das deformações de rotura medidas (Figuras 12.6, 12.8 e 12.13) superiores a 20% são comuns em adesivos estruturais dúcteis. [22]

4.2 Ensaios ENF

A Figura 4.14 apresenta as curvas $P - \delta$ dos 3 provetes cujos resultados de G_{IIc} foram considerados válidos. É importante referir que:

- Foram realizados mais 2 ensaios que permitiram apenas medir a rigidez inicial;
- A propagação foi estável inicialmente em todos os provetes, mas em 2 deles foi seguida de propagação instável.

A Figura 4.15 mostra que foi atingido um patamar de G_{IIc} , o que dá forte indicações:

- Da validade dos resultados;
- Que a forma como foi criada a pré-fenda não influenciou os resultados, o que se explica parcialmente pela elevada tenacidade do adesivo.

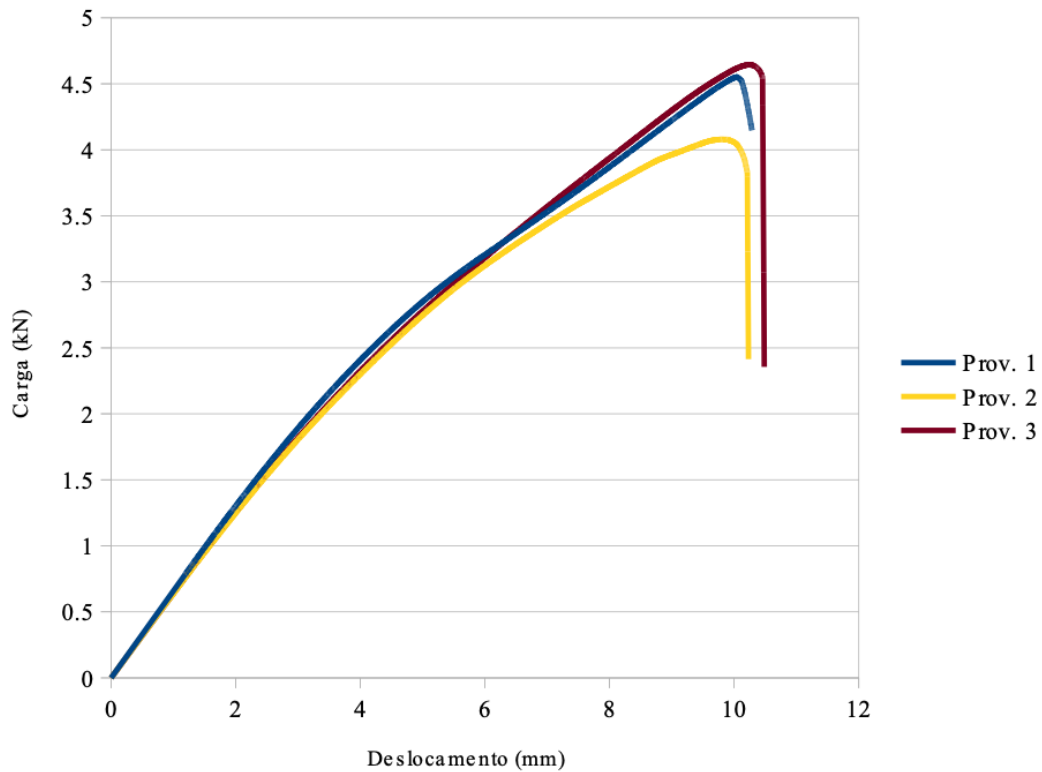


Figura 4.14: Curvas $P-\delta$ medidas nos ensaios válidos.

Por outro lado, as curvas $P-\delta$ e $G_{II}-a_e$ têm formas diferentes das previstas pelos modelos de zona coesiva habitualmente usados para caracterizar a fratura em modo II [21]. Isto nota-se mais nos provetes nº 1 e nº 3, nos quais as curvas $G_{II}-a_e$ têm uma pendente ascendente bastante pronunciada antes de atingir o limiar do patamar.

A Figura 4.16 mostra que houve bastante variabilidade na estimativa do módulo de corte do adesivo G_a calculado a partir do parâmetro λ (Equação 11.3), que foi obtido da flexibilidade inicial. Isto explica-se pelo elevado comprimento do provete, que aumenta a variabilidade das dimensões das barras e da camada adesiva. Não obstante, os valores são realistas, e semelhantes aos estimados nos ensaios de flexão a partir da flexibilidade inicial.

Por seu turno, os valores de G_{IIc} , que são o resultado principal do ensaio ENF, revelaram-se muito consistentes, com baixa variabilidade na zona entre o ponto de carga máxima e o fim do patamar subsequente (Figura 4.17).

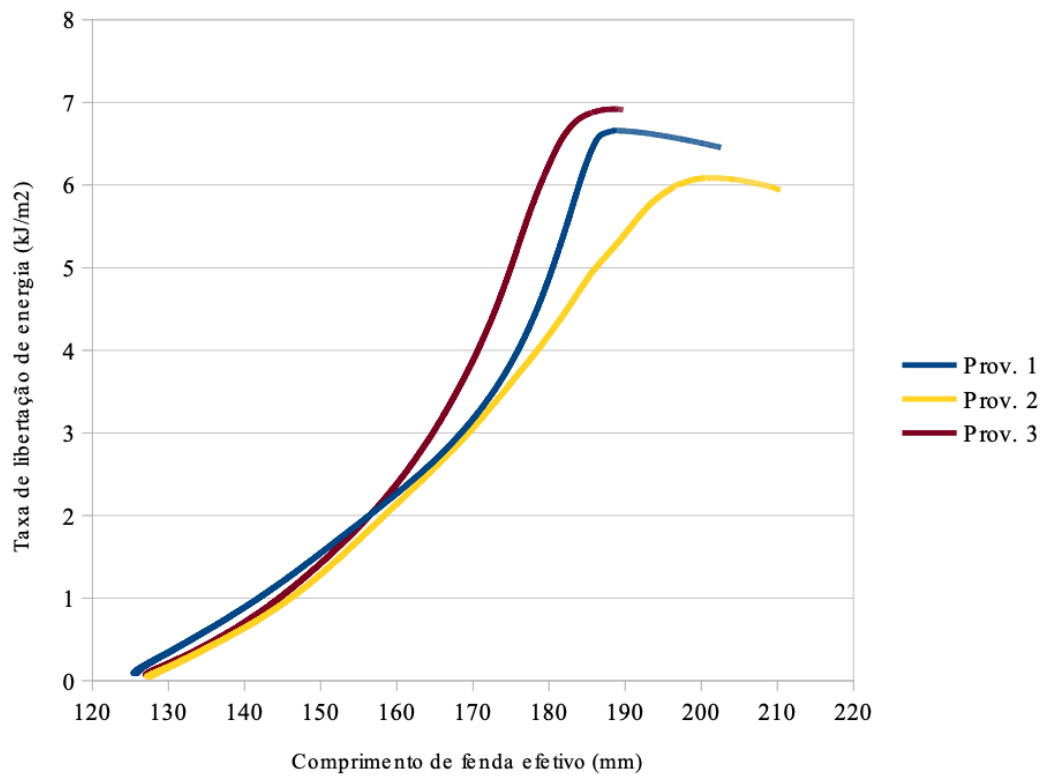


Figura 4.15: Curvas $G_{II} - a_e$ obtidas para os 3 provetes com resultados válidos.

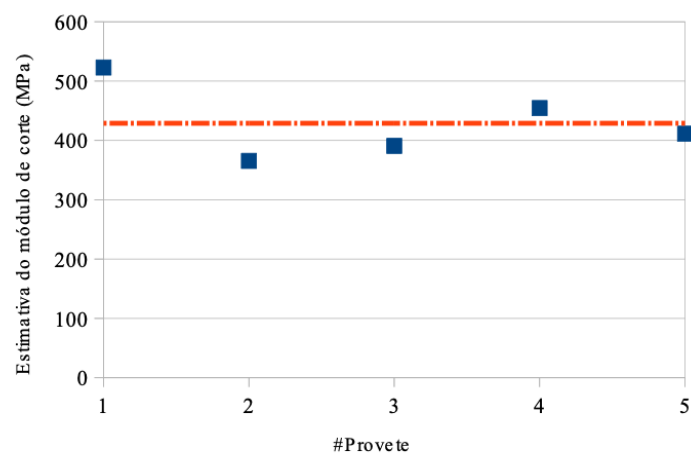


Figura 4.16: Estimativa de G_a calculado a partir da flexibilidade inicial. A linha vermelha representa o valor médio.

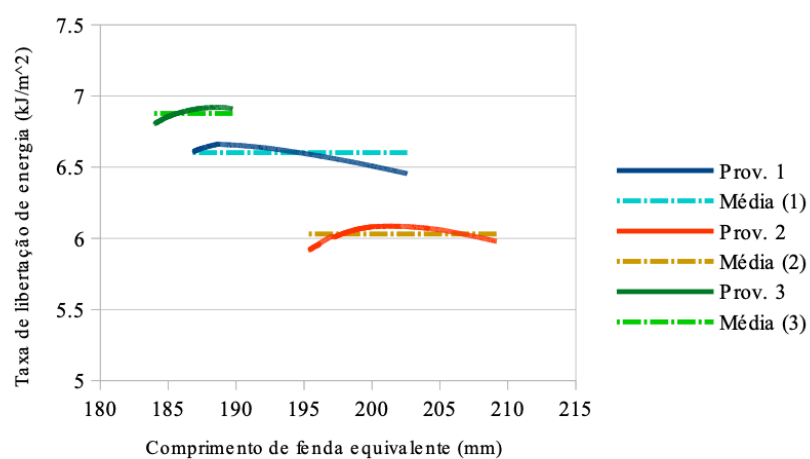


Figura 4.17: Curvas $G_{II} - a_e$ entre o ponto de carga máxima e o fim do patamar. As linhas “traço-ponto” correspondem aos valores médios.

Capítulo 5

Conclusões

Neste trabalho foram realizados dois testes de ligações coladas de aço com um adesivo acrílico comum, nomeadamente:

- Ensaios de flexão em 3 pontos, tendo por fim medir a resistência ao corte do adesivo. Trata-se de um ensaio simples de realizar mas de análise mais complicada;
- Ensaios *End-Notched Flexure* (ENF), que permitem avaliar o comportamento à fratura em modo II, expresso pela taxa crítica de libertação de energia de deformação G_{IIc} .

Para que os resultados fossem os mais corretos possível, recorreu-se à correlação digital de imagem (CDI) com o sistema ARAMIS para medir deslocamentos e deformações, bem como a modelos de análise elasto-plásticos.

Do ensaio de flexão, que foi aplicado neste trabalho pela primeira vez nos moldes recentemente propostos, tiraram-se as seguintes conclusões principais:

- As curvas carga-deslocamento tiveram formas semelhantes às previstas pelo modelo elasto-perfeitamente plástico usado para analisar os dados experimentais;
- Todavia, o modelo teve pequenas discrepâncias com as curvas experimentais que geraram alguma incerteza na estimativa módulo de corte;
- As tensões de rotura obtidas atingiram os valores máximos esperados face aos dados do fornecedor, e não foram sensíveis à referida incerteza no módulo de corte;
- Devido à elevada rigidez do provete, as medições da CDI só foram viáveis a níveis de carga acima de 60% da carga de rotura.
- As distribuições de deformações de corte no adesivo medidas pela CDI foram coerentes com as previsões do modelo elasto-perfeitamente plástico, mas este subestimou as deformações máximas.

No caso dos ensaios ENF, os resultados permitiram concluir que:

- O método da fenda efetiva numa versão proposta recentemente permite obter estimativas realistas do módulo de corte do adesivo, ainda que com alguma dispersão;
- Foi possível medir valores robustos de G_{IIc} , dado que se atingiu um patamar nas curvas G_{IIc} -comprimento de fenda efetiva a_e ;
- As curvas $G_{IIc} - a_e$ antes do referido patamar tiveram formas algo fora do comum.

Assim, é possível propor trabalhos futuros que permitam esclarecer algumas das questões acima referidas e, no fundo, obter resultados mais rigorosos:

- Aplicar à análise do ensaio de flexão modelos com descrição mais completa do comportamento tensão-deformação ao corte do adesivo do que a elasto-perfeitamente plástica. Isto pode exigir o recurso a modelos de elementos finitos;
- Estudar novas formas de usar a CDI, tendo por objetivos principais diminuir os níveis de ruído e conseguir medir as deformações logo a partir das cargas mais baixas;
- Desenvolver e aplicar modelos de zona coesiva para análise dos resultados dos ensaios ENF, procurando explicar as causas da forma inesperada das curvas $G_{IIc} - a_e$ medidas;
- Estudar e comparar os comportamentos ao corte e à fratura em modo II de diferentes colas;
- Do ponto de vista mais prático, desenvolver um dispositivo que permita efetuar mais facilmente as colagens com a rapidez necessária e a garantia de alinhamento e controlo da espessura da cola.

Referências

- [1] da Silva, L. F. M., Magalhães A. G., de Moura M. F. S. F. Juntas adesivas estruturais. Publindústria, 2007.
- [2] Johnson, W. S., Butkis, L. M., Valentin, R. V. Applications of Fracture Mechanics to the Durability of Bonded Composite Joints. DOT/FAA/AR-97/56, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration Office of Aviation Research, 1998.
- [3] Alfonso, L., Badulescu, C., Carrere, N. Use of the modified Arcan fixture to study the strength of bonded assemblies for automotive applications. International Journal of Adhesion and Adhesives, Volume 80, pp. 104-114, 2018.
- [4] Leitão, A. C. C. Aplicação de um método de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fratura em corte de adesivos estruturais. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2015.
- [5] Fiuza, G C. C. Análise de comportamento mecânico de juntas coladas multimateriais. Projeto Final de Bacharelato em Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ, 2016.
- [6] Potter, D. L. Primary adhesively bonded structure technology (PABST). Design Handbook for Adhesive Bonding. Technical Report AFFDL-TR-79, Douglas Aircraft Company, 1979.
- [7] Thakare, N. B., Dhumne, A. B. A Review on Design and Analysis of Adhesive Bonded Joint by Finite Element Analysis. SSRG International Journal of Mechanical Engineering (SSRG-IJME), Volume 2, pp. 20-25, 2015.
- [8] Pereira, A. M. B. Fratura de juntas coladas. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, 2002.
- [9] Teixeira, L. M. B. S. Caracterização do comportamento mecânico de juntas de sobreposição simples coladas com adesivos estruturais. Dissertação de Mestrado em Manutenção Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2000.
- [10] Ribeiro, A. S., de Jesus, A.M.P., Ferreira, A. J. M. Comportamento Estático e à Fadiga de Juntas Coladas. Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões, Volume 16, pp. 81-87, 2008.

- [11] Fontes, J. S. Aplicação da correlação digital de imagem ao estudo da fratura em modo I de ligações coladas. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, 2017.
- [12] Hysol Surface Preparation Guide. Henkel Corporation, 2006.
- [13] Santos, H. F. O. P. Análise do efeito do "taper" na resistência de juntas coladas. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projecto, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade do Coimbra, 2015.
- [14] Neto, S. V. Estudo de junções aeronáuticas híbridas (metal-compósito) unidas mecanicamente. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, 2010.
- [15] de Moraes, A. B. Analysis of the adhesively bonded three-point bending specimen for evaluation of adhesive shear behaviour. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Volume 74, pp.40-48, 2017.
- [16] Fernandes, R. M. R. P. Definição de uma lei coesiva para juntas coladas em Carbono-Epóxico solicitadas em Modo II. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- [17] Chaves, F. J. P., da Silva, L. F. M., de Moura, M. F.S.F., Dillard, D. A., Esteves, V. H. C. Fracture mechanics tests in adhesively bonded joints: A literature review. *Journal of Adhesion*, Volume 90, pp. 955-992, 2014.
- [18] de Moraes A. B. Elastic-plastic analysis of the adhesively bonded end-notched flexure specimen. *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 188, pp. 80-92, 2018.
- [19] Moreira, P. G. M. O. Desenvolvimento de Algoritmo de Correlação Digital de Imagem para Avaliação de Grandes Deformações. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2015.
- [20] GOM Optical Measuring Techniques. Aramis user manual-software. Braunschweig, Germany, 2007.
- [21] de Moraes A. B. Analysis of the fracture process zone and effective crack length in the adhesively bonded end-notched flexure specimen. *The Journal of Adhesion*, In press.
- [22] Kadioglu, F., Vaughn, L. F., Guild, F. J., Adams, R. D. Use of the thick adherend shear test for shear stress-strain measurements of stiff and flexible adhesives. *The Journal of Adhesion*, Volume 78, pp. 355-381, 2002.

Anexo A

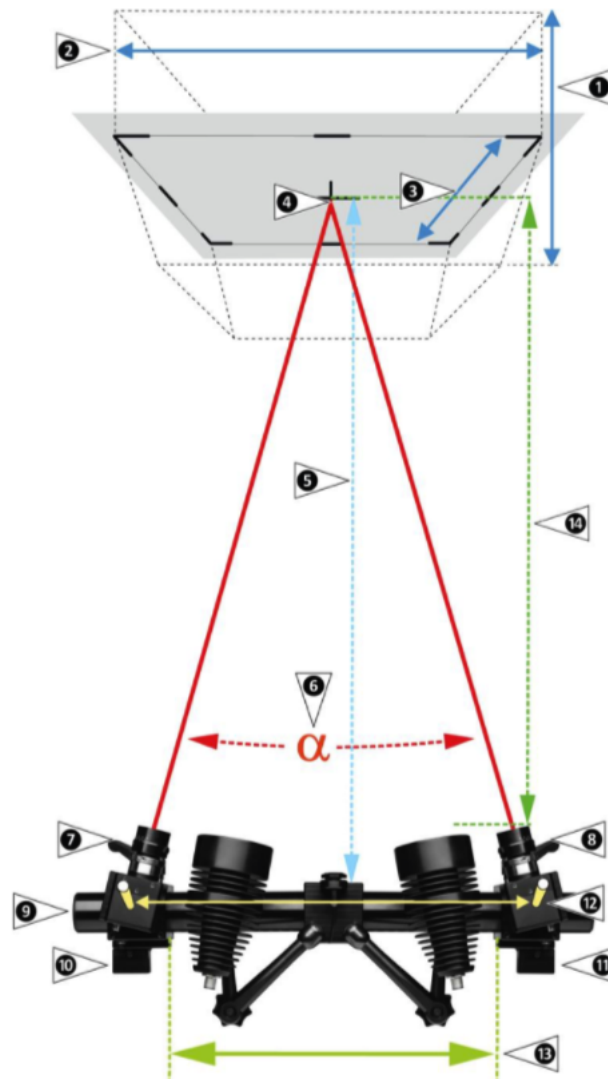


Figura 1. Unidade do sensor 3D na vista superior.

- | | | | |
|---|-----------------------------------|----|----------------------------|
| 1 | Altura H (volume de medição) | 7 | Lente da câmera esquerda L |
| 2 | Comprimento L (volume de medição) | 8 | Lente da câmera direita R |
| 3 | Largura W (volume de medição) | 9 | Suporte da câmera |
| 4 | Centro do volume de medição | 10 | Slider esquerdo |
| 5 | Distância de medição | 11 | Slider direito |
| 6 | Ângulo da câmera | 12 | Distância da base |
| | | 13 | Distância do slider |
| | | 14 | Largura interna |